

І.Ділай. Основи побудови дросельних синтезаторів газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів / І.Ділай // Вісник ТНТУ. — 2013. — Том 70. — № 2. — С.164-172. — (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

УДК 681.2.53.082.3:543.08

І. Ділай, канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка»

ОСНОВИ ПОБУДОВИ ДРОСЕЛЬНИХ СИНТЕЗАТОРІВ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ З МІКРОКОНЦЕНТРАЦІЯМИ КОМПОНЕНТІВ

Резюме. Запропоновано будувати газодинамічні пристрої для приготування складних багатокомпонентних сумішей з мікроконцентраціями компонентів як поєднання двох функціонально зв'язаних елементів – змішувача і блока стабілізованих тисків живлення. Така побудова забезпечує відтворення суттєво різних тисків (перепадів тисків) на дозуючих капілярах змішувача, отриманих у міждросельних камерах подільників тиску блока живлення. Як приклад застосування розроблено принципову схему синтезатора потрібних газових сумішей $\text{Ar-O}_2\text{-N}_2$ для перевірки газоаналітичної апаратури, призначеної для визначення чистоти аргону.

Ключові слова: газодинамічний синтезатор, капіляр, мікроконцентрація компоненту суміші.

I. Dilay

FUNDAMENTALS OF CONSTRUCTION OF MIXED GASSES THROTTLE SYNTHESIZERS WITH THE TRACE COMPONENTS

Summary. The problem of preparation of the specified mixed gasses has not been solved yet and is of special importance for the multicomponent mixtures, the part of components of which is on the level of trace concentrations. One of the most promising methods of the mixed gasses synthesis is the dynamic method based on the dosage of gas flows with the glass capillary pipes. The objective of the work is to develop the principles of construction of high-precision and reliable mixtures synthesizers with the trace components basing on this method.

Apart from the known principles of gas-dynamic synthesizers construction, the paper proposes the new ones, which provide the preparation of mixtures with the concentrations up to 10^{-5} %. The synthesizer should be composed of two functionally bound components a mixer and the stabilized static condition power unit, which are the flow summarizers and the pressure dividers respectively, based on linear capillaries. This provides the reproduction of pressure ratios on the mixer's dosing capillaries, thousands of times different, which accordingly creates flows of components of different values. Stabilized static condition power unit is based on the tandem pressure dividers, where the input pressure of each lower level divider is equal to the smallest inter-throttle pressure of the higher level divider. Linearity of all synthesizer's capillaries provides for the proportional change of all the pressures on the dosing capillaries in the case of possible changes of the pressures of the components sources, barometric pressure, etc. The power unit pressures on the dosing capillaries are reproduced on the dosing capillaries with the help of the pressure repeaters. In order to compensate the major influences (pressures and temperatures) new independences are developed, which take into account the pressure changes inequality on the mixer capillaries.

As an example of the implementation of new principles of gas-dynamic synthesizers for the preparation of mixtures with the components traces our triple mixtures synthesizer for the gas mixtures $\text{Ar-O}_2\text{-N}_2$ testing the analytical equipment designed for the determination of the argon purity.

Key words: gas-dynamic synthesizer, capillary, intermixture traces.

Об'єкт і предмет дослідження. Газові суміші є необхідними в різноманітних технологіях, у дослідницькій практиці, незамінними для метрологічного забезпечення газоаналітичних вимірювань, а також для забезпечення життєдіяльності людини [1 – 3]. Поширене сьогодні продукування газових сумішей методом парціальних тисків (у балонах під високим тиском) має суттєві обмеження щодо точності та відтворення

концентрацій компонентів і особливо стосовно багатокомпонентних сумішей з мікроконцентраціями компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій дає підстави стверджувати, що найперспективнішими для приготування сумішей заданого складу є газодинамічні синтезатори (ГДС) – пристрої змішування дозованих дросельними елементами газових потоків [1, 2].

У роботах [4, 5] сформульовані базові принципи побудови ГДС, проте вони в основному стосуються приготування сумішей, які містять компоненти на рівні макроконцентрацій. Оскільки питання синтезу складних багатокомпонентних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів залишається актуальним, то розроблення нових принципів для його вирішення є безперечно важливим.

Метою роботи є доповнення системи відомих [4] принципів побудови газодинамічних синтезаторів принципами, які можуть забезпечити приготування синтезаторами сумішей як з макро- так і мікроконцентраціями компонентів та їх високі метрологічні й експлуатаційні характеристики.

Принципи побудови ГДС. Залежно від сфери застосування до синтезаторів газових сумішей висувають різні вимоги, зокрема до виду, кількості та діапазонів концентрацій компонентів суміші, точності задавання й підтримання концентрацій, кількості синтезованих сумішей, витрати суміші (постійна чи змінна), а також до тиску суміші на виході синтезатора. Зазначені вимоги визначають як структуру принципової схеми синтезатора, так і його реалізацію.

Серед застосовуваних газових сумішей значне місце займають ті, які містять компоненти на рівні мікроконцентрацій. Це, наприклад, природний та димові гази (зокрема, викиди теплових електростанцій), повітря зі шкідливими компонентами тощо.

Нижче перелічені базові принципи створення ГДС високоточних газових сумішей заданого складу в основному в діапазоні макроконцентрацій:

- 1) побудова синтезатора на основі суматора потоків;
- 2) застосування в каналах окремих компонентів суміші пакетів дозуючих дроселів з дискретно змінюваним газодинамічним опором;
- 3) забезпечення однакових і стабільних умов дозування компонентів;
- 4) застосування капілярів (скляних капілярних трубок) як дозуючих дроселів;
- 5) компенсація похибок концентрацій компонентів суміші від основних факторів впливу завдяки конструкції капілярів суматора;
- 6) використання дроселів з рівними газодинамічними опорами на одному та різних газах;
- 7) застосування еквівалентних дроселів з кратним опором (провідністю) до базового;
- 8) багатостадійне розчинення для отримання низьких концентрацій компонентів;
- 9) використання в одному ГДС капілярів як за опорами, так і капілярів за провідностями, кратних базовому.

Така побудова ГДС у принципі може забезпечити створення пристроїв синтезу складних ГС заданого складу з мікроконцентраціями окремих компонентів. Для цього необхідно застосовувати велику кількість (сотні й тисячі) капілярів і/або багатостадійне розчинення окремих компонентів із скиданням значної частини отримуваних проміжних сумішей, що є неекономним. Крім цього, ускладнення синтезаторів може призвести до значного збільшення похибок концентрацій компонентів синтезованої суміші.

Особливості приготування складних багатокомпонентних сумішей з мікро- і наноконцентраціями компонентів (діапазони відповідають $10^{-2} \dots 10^{-4} \%$ і $10^{-4} \dots 10^{-6} \%$) потребують подальшого розроблення й удосконалення принципів побудови ГДС. У зв'язку з цим і для розширення можливостей ГДС газових сумішей заданого складу з мікроконцентраціями компонентів ми розробили принципи, які доповнюють базові й викладені нижче.

1. *Побудова ГДС на основі функціонального поєднання змішувача і блока стабілізованих тисків живлення.* Таке поєднання забезпечує одностадійність приготування сумішей з мікроконцентраціями компонентів, суттєве зменшення кількості дозуючих капілярів, а також вищі точність та відтворюваність умісту компонентів.

2. *Забезпечення різних перепадів тисків на капілярах змішувача для різних компонентів.* Капіляри, встановлені в каналі компонента з найменшою концентрацією r_{min} в суміші, повинні дозувати найменшу витрату, а капіляри в каналі компонента з найбільшою концентрацією r_{max} в суміші – найбільшу. Для компонента з r_{min} цього досягають встановленням мінімально можливого перепаду тиску ΔP_{min} і вибором найменшого з доступних діаметрів d_{min} прохідного каналу капіляра і довжиною l прийнятних розмірів. Довжина капіляра може бути обмежена або критерієм Рейнольдса ($Re < 2320$), або характером (кривизною) витратної характеристики. Для компонента з r_{max} встановлюють максимально можливий перепад тиску ΔP_{max} , а розміри прохідного каналу капіляра вибирають із діапазону прийнятних конструкцій ($d \in [0,064; 0,5]$ мм і $l \in [5; 150]$ мм). Для компонентів з концентраціями $r \in (r_{min}; r_{max})$ задають проміжні значення перепадів $\Delta P \in (\Delta P_{min}; \Delta P_{max})$ згідно з концентраціями компонентів у суміші.

3. *Задавання перепадів тисків на капілярах змішувача з подільника тисків.* Перепади тисків на дозуючих капілярах змішувача потрібно задавати повторювачами тисків багатоелементного подільника (див. рис. 1), кількість капілярів якого визначається кількістю суттєво різних концентрацій компонентів у синтезованій суміші.

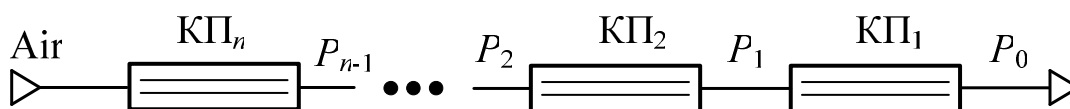


Рисунок 1. Принципова схема n елементного подільника тисків:

$КП_i$ – i -й капіляр подільника, $i=1, \dots, n$; P_i – міжросельний тиск на вході i -го капіляра;

P_0 – стабілізований абсолютний тиск на виході першого капіляра

Figure 1. Schematic diagram of the n elements pressures divider:

$КП_i$ – i dividers capillary, $i=1, \dots, n$; P_i – inter-throttle pressure of inlet i capillary;

P_0 – stabilized absolute pressure at the outlet of the first capillary

Система рівнянь для визначення розмірів прохідних каналів усіх капілярів лінійного подільника із заданими значеннями міжросельних тисків (коефіцієнтів поділу) має вигляд [6]

$$\left. \begin{aligned} d_j &= d_{(j-1)} / g_j; \\ l_j &= l_{(j-1)} / y_j, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{де } j = \overline{2, n}; \quad d_{(j-1)} = \left[\sum_{i=1}^{j-1} d_i^{-4} \right]^{-1/4}; \quad g_j = (D_{(j-1)}^2 - 1)^{1/4}; \quad l_{(j-1)} = \chi d_{(j-1)}^2; \quad y_j = D_{(j-1)} + 1;$$

$$D_{(j-1)} = D_{j-1} / D_j; \quad D_{j-1} = \Delta_P / \Delta_{P_{j-1}} = 1 / k_{j-1}; \quad \Delta_{P_{j-1}} = P_{j-1} - P_0; \quad \chi = P_0 \sqrt{\xi X}.$$

Розміри (d_1, l_1) прохідного каналу першого капіляра КП₁ подільника визначають із умови лінійності витратної характеристики [6]

$$P_0^2 Y_1 = 1, \quad (2)$$

де P_0 – тиск газу на виході капіляра; $Y_1 = K_1 X$ – комплекс розмірів каналу капіляра, параметрів газових компонентів; $K_1 = \xi d_1^4 / l_1^2$ – конструктивний комплекс; ξ – коефіцієнт кінцевих ефектів; $X = (512 R_g T \mu^2)^{-1} = 2,349085 \cdot 10^{-7} M / (T \mu^2)$ – параметричний комплекс; R_g – газова стала; μ – динамічна в'язкість газу за температури T ; M – молекулярна маса газу.

4. *Застосування в блоці стабілізованих тисків живлення каскадного з'єднання кількох подільників тиску.* Каскадне з'єднання подільників забезпечує поділ наступним подільником перепаду на останньому капілярі попереднього (починаючи з першого) подільника (див. рис. 2). Наприклад, на одному каскаді подільника, який працює на повітрі, через різні обмеження можна досягти співвідношення $\Delta_{P_{max}} / \Delta_{P_{min}} \approx 27$, а при застосуванні вже двох каскадів воно може бути на рівні 700.

Розміри $(d_{k,1}, l_{k,1})$ першого капіляра усіх подільників $(k = 1, \dots, K)$ визначають із умови лінійності витратної характеристики, а прохідних каналів $(d_{k,m}, l_{k,m})$ решти капілярів КП _{k,m} ($m = 2, \dots, M_k$) усіх каскадів $(k = 1, \dots, K)$ блока стабілізованих тисків живлення визначають за допомогою системи рекурентних залежностей, отриманих з витратної характеристики капіляра й умови її лінійності,

$$\left. \begin{aligned} d_{k,m+1} &= D_{k,m} / g_{k,m+1}; \\ l_{k,m+1} &= L_{k,m} / y_{k,m+1}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\text{де } k = \overline{1, K}; \quad m = \overline{1, M_k - 1}; \quad D_{k,m} = \left[\sum_{p=1}^m d_{k,p}^{-4} \right]^{-1/4}; \quad g_{k,m+1} = (D_{k,m}^2 - 1)^{1/4};$$

$$D_{k,m} = \Delta_{P_{k,m+1}} / \Delta_{P_{k,m}}; \quad \Delta_{P_{k,m}} = P_{k,m} - P_0; \quad L_{k,m} = \omega D_{k,m}^2; \quad \omega = P_0 \sqrt{\xi X}; \quad y_{k,m+1} = D_{k,m} + 1.$$

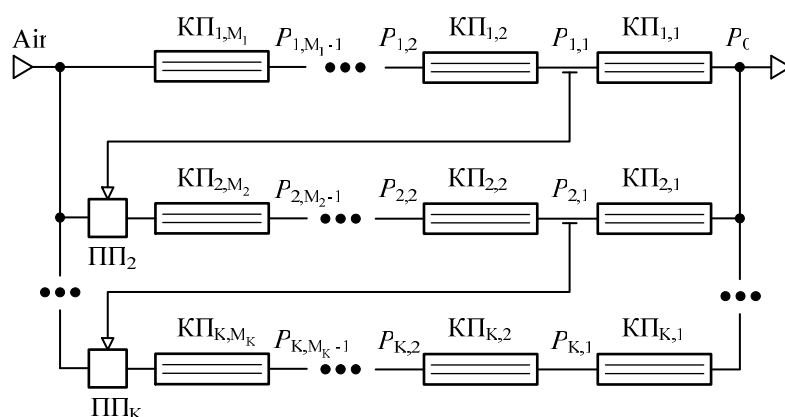


Рисунок 2. Принципова схема каскадного блока стабілізованих тисків живлення: ПП_k – повторювач тиску на вході k-го подільника; КП_{k,m} і P_{k,m} – m-й капіляр k-го подільника і тиск на вході цього капіляра

Figure 2. Schematic diagram of the cascade stabilized pressure power unit: ПП_k – pressure repeater on the entrance of k divider; КП_{k,m} і P_{k,m} – m capillary of k divider and the pressure on the entrance of this capillary

5. Використання в змішувачі та подільниках блока живлення ГДС лінійних капілярів. Лінійні капіляри – капілярні трубки з такими розмірами (d і l) прохідного каналу, які забезпечують лінійну залежність витрати дозованого газу від перепаду тисків при фіксованому тиску на виході капіляра. Застосування таких капілярів дає можливість пропорційно змінювати всі міждросельні тиски подільника, а, отже, й витрати компонентів через дозуючі капіляри змішувача. Таким чином компенсують зміну тиску живлення подільника, а крім того можна змінювати в певних межах і витрату приготовлюваної суміші при незмінних концентраціях її компонентів завдяки зміні тиску на вході першого подільника блока живлення.

6. Застосування повітря як робочого газу в блоці стабілізованих тисків живлення. Застосування блока живлення (подільники якого працюють на повітрі) сприяє економному використанню чистих компонентів, оскільки приготування сумішей з мікроконцентраціями компонентів стало можливим на одній стадії розчинення без скидання значної частини проміжних сумішей (чистих компонентів).

7. Відтворення міждросельних тисків подільника у змішувачі з допомогою повторювачів тиску. Для високоточного відтворення тисків розроблена також система, елементами якої є повторювач, нуль-індикатор перепаду тисків, виконавчий механізм і коректуючий дросель.

8. Для уможливлення компенсації основних факторів впливу (тисків і температур) розроблені нові залежності, які враховують нерівність перепадів тисків на капілярах змішувача і нелінійність залежності в'язкості від температури:

➤ при компенсації температури

$$K_2 = (X_2 B_2)^{-1} \{ \bar{M}^2 (1 + Z_1) - 1 \}, \quad (4)$$

$$l_2 = (r_1^{-1} - 1) \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{\sqrt{1 + Z_1} - 1}{\sqrt{1 + Z_2} - 1} l_1; \quad d_2 = (K_2 l_2^2 / \xi)^{1/4}, \quad (5)$$

де, крім відомих, r_1 – концентрація 1-го компонента бінарної газової суміші; $B_i = P_i^2 - P_0^2$ – комплекс тисків, $i=1, 2$; $Z_i = K_i X_i B_i$ – комплекс розмірів прохідного каналу капіляра і параметрів стану газу; $\bar{M} = \bar{\mu}_2 \bar{\mu}_1^{-1} \mu_1 \mu_2^{-1}$;

$\bar{\mu}_1 = \mu_1 + 2(2a_{2,1} T + a_{1,1}) T$; $\bar{\mu}_2 = \mu_2 + 2(2a_{2,2} T + a_{1,2}) T$; $\mu_i = a_{2,i} T^2 + a_{1,i} T + a_{0,i}$ – в'язкість газових компонентів; $a_{2,i}$, $a_{1,i}$, $a_{0,i}$ – коефіцієнти квадратичної апроксимації в'язкості газових компонентів;

➤ при компенсації тисків

$$l_2 = \frac{r_2}{r_1} \frac{\mu_1}{\mu_2} l_1; \quad d_2 = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{1/2} \left(\frac{B_1}{B_2} \frac{R_{e2}}{R_{e1}} \right)^{1/4} d_1. \quad (6)$$

9. Заміна капіляра неприйнятних розмірів ($d > 0,5$ чи $l > 150$ мм) пакетом n капілярів з ідентичною витратною характеристикою ($K_p = K_k$), що здійснюється за формулами

$$l_p = l_k / n; \quad d_p = d_k / n^{1/2}, \quad (7)$$

де параметри K_p , l_p , d_p стосуються пакета, а K_k , l_k , d_k – капіляра неприйнятних розмірів; n – довільне натуральне число, що забезпечує задовільні розміри капіляра.

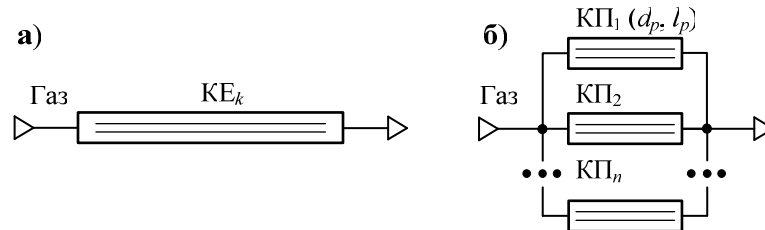


Рисунок 3. Капіляр і пакет капілярів з ідентичними витратними характеристиками:

- а) капіляр KE_k з неприйнятними розмірами прохідного каналу;
- б) пакет з n однакових капілярів КП задовільних розмірів

Figure 3. Capillary and capillaries package with identical flow characteristics:

- a) capillary KE_k of walk-through channel unacceptable dimensions;
- b) package of n identical capillaries КП of satisfactory dimensions

10. Застосування багатостадійного розчинення для отримання наднизьких концентрацій компонентів у поєднанні зі встановленням різних перепадів тисків на капілярах змішувача для різних компонентів.

ГДС для перевірки газоаналізатора аргону. За останні десятиліття аргон як найдоступніший і відносно дешевий інертний газ став продуктом масового виробництва. Значну частину отриманого аргону використовують у металургії, металообробці та інших галузях виробництва. Інертні гази, зокрема й аргон, використовують для зварювання хімічно активних металів (титан, алюміній, магній), а також для отримання зварних швів, однорідних за складом з основним і металом присадки. Крім того, інертні гази захищають дугу і зварюваний метал [7]. Якість отримуваних швів залежить від чистоти аргону, а тому важливим завданням є контроль його складу газоаналітичною апаратурою.

На основі нових принципів ми розробили ГДС, принципова схема якого зображена на рисунку 4. Синтезатор призначений для приготування перевірювальних трикомпонентних газових сумішей Ar-O₂-N₂, в яких домішками є O₂ (0,002...0,004 %) і N₂ (0,003...0,005 %).

Синтезатор містить змішувач 1, у вхідні канали якого подають відповідно чисті Ar, N₂ і O₂. В каналах цих компонентів встановлено по три капіляри, які дозують

відповідні гази при перепаді тиску на них $\Delta p = 100$ Па. Капіляри КЗ₇, ..., КЗ₉ у каналі N₂ призначені для забезпечення концентрацій $r_{N_2} \in \{0,003; 0,004; 0,005\}$ %, КЗ₄, ..., КЗ₆ – для забезпечення концентрацій $r_{O_2} \in \{0,002; 0,003; 0,004\}$ %, а КЗ₁, ..., КЗ₃ – $\{0,001; 0,001; 0,002\}$ % використовують для компенсації зміни концентрації (витрати) одного із компонентів домішки аргонном. Крім того, в лінії Ar окремо встановлено пакет ПК з $n=9$ постійних капілярів, на якому підтримують значно більший перепад тиску – $\Delta p = 47$ кПа для дозування основного потоку аргону. На виході кожного з дев'яти капілярів КЗ_{*i*} встановлено відповідний клапан ЕК_{*i*} ($i=1, \dots, 9$), керований мікроконтролером МК. Усі елементи змішувача 1 і блока 2 живлення розміщені в термостаті 3 з температурою $T = 300 \pm 0,1$ К.

Блок стабілізованих тисків живлення (див. рис. 2б) виконано як каскадне з'єднання двох двоелементних лінійних подільників тиску. Повторювачами ПЗ₁,...,ПЗ₄ міжросельні тиски $P_{1,2} = 167$ кПа і $P_{2,1} = 120,1$ кПа відтворюють відповідно на входах капілярів змішувача 1, а повторювачем ПЗ₀ тиск $P_0 = 120$ кПа – на виході капілярів. Повторювач ПП_{2,1} призначений для відтворення міжросельного тиску $P_{1,1} = 122,1$ кПа на вході другого подільника.

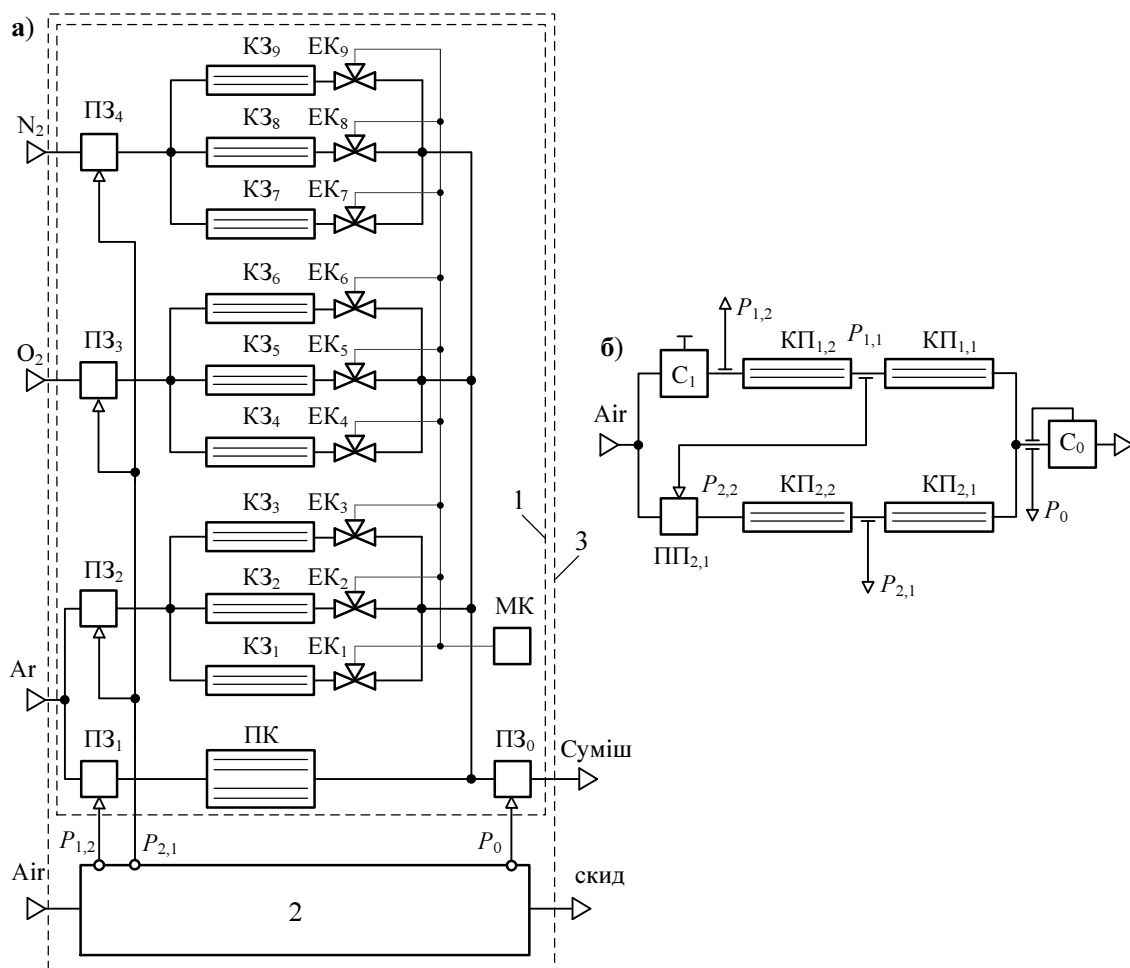


Рисунок 4. Принципові схеми: а) ГДС для приготування трикомпонентних перевірювальних газових сумішей «аргон-домішки»; б) блока стабілізованих тисків живлення.

1 – змішувач чистих газових компонентів; 2 – блок стабілізованих тисків живлення; 3 – термостат

Figure 4. Principal schemes: a) synthesizer for preparation of three-component calibration gas mixtures "argon- impurities"; b) stabilized pressure power unit. 1 – pure gas components mixer; 2 – stabilized pressure power unit; 3 – thermostat

Для забезпечення постійного значення абсолютного тиску P_0 на виходах перших капілярів КП_{1,1} і КП_{2,1} подільників встановлено стабілізатор C_0 абсолютного тиску «до себе». На вході першого подільника достатньо застосування стабілізатора надлишкового тиску C_1 , оскільки розміри всіх капілярів подільників, отримані з системи (3), одночасно забезпечують лінійні зміни всіх міждросельних тисків при можливих змінах абсолютних тисків на вході подільника, а відтак – і пропорційні зміни тисків живлення змішувача 1. Таке виконання капілярів змішувача і блока живлення забезпечує незмінність концентрації компонентів суміші.

Розміри (d, l в мм) прохідних каналів лінійних капілярів:

- змішувача 1 на лінії:
 - аргону – $d_1 = d_2 = 0,064$; $l_1 = l_2 = 6,3$; $d_3 = 0,090$; $l_3 = 12,6$;
 - кисню – $d_4 = 0,096$; $l_4 = 13,9$; $d_5 = 0,117$; $l_5 = 20,8$; $d_6 = 0,135$; $l_6 = 27,7$;
 - азоту – $d_7 = 0,121$; $l_7 = 24,0$; $d_8 = 0,140$; $l_8 = 32,1$; $d_9 = 0,156$; $l_9 = 40,1$
- для дозування основного потоку Ar отримано капіляр ($d = 0,933$; $l = 1341,9$) неприйнятних розмірів, замінений пакетом з $n = 9$ капілярів ($d_n = 0,311$; $l_n = 149,1$);
- подільників блока 2 стабілізованих тисків живлення:
 - $d_{1,1} = 0,305$; $l_{1,1} = 149,7$; $d_{1,2} = 0,064$; $l_{1,2} = 6,4$;
 - $d_{2,1} = 0,305$; $l_{2,1} = 149,7$; $d_{2,2} = 0,066$; $l_{2,2} = 6,8$.

Висновки. Сформульовано принципи побудови високоточних і надійних газодинамічних синтезаторів для приготування газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів, серед яких найважливішим є створення на дозуючих капілярах змішувача перепадів тисків, які відрізняються в сотні разів, що забезпечує разом з різною провідністю дозуючих капілярів відповідно суттєво різні за величиною потоки компонентів. Крім того, розроблений каскадний подільник тиску для відтворення суттєво різних перепадів тисків, отримано умови компенсації впливу зовнішніх факторів на концентрацію компонентів синтезованої суміші та конструювання капілярів задовільних розмірів.

Розроблено принципову схему синтезатора для калібрування газоаналітичної апаратури контролю чистоти аргону.

Conclusions. The principles of high-precision and reliable synthesizers are stated for the preparation of mixed gasses with the intermixture traces, among which the most important is the creation of the pressure differences on the mixer dosing capillaries which differ in thousands times which accordingly creates flows of components of different values along with the different conductivity of dosing capillaries. Besides, the cascade pressure divider for the reproduction of sufficiently different pressure changes was developed, the conditions were obtained for the compensation of the external factors influence on the concentration of the synthesized mixture components and construction of the appropriate capillaries.

The principal synthesizer scheme was developed for the calibration of gas-analytical equipment of argon purity control.

Список використаної літератури

1. 6th International Symposium Gas Analysis & Exhibition (GAS 2011) 9-11 February 2011 – Beurs-WTC Rotterdam. Режим доступу: <http://www.gas2011.org/publicaties/4324>.
2. Gary O. Nelson. Gas mixtures: preparation and control. Lewis Publishers, 1992. – 294 p.
3. Рейман, Л.В. Техника микродозирования газов (Методы и средства для получения газовых смесей): спр. пособие [Текст] / Л.В. Рейман. – Л.: Химия, 1985. – 224 с.

4. Теплюх, З.М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей [Текст] / З.М. Теплюх // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Автоматика, вимірювання та керування. – 2006. – №551. – С. 87 – 94.
5. Ділай, І.В. Газодинамічний синтезатор для калібрування хроматографів на природний газ [Текст] / І.В. Ділай, З.М. Теплюх // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – №23. – С. 49 – 54.
6. Ділай, І.В. Побудова подільників тиску для живлення газодинамічних дросельних синтезаторів [Текст] / І.В. Ділай, З.М. Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація". – 2009. – № 659. – С. 120 – 128.
7. Центр технических газов и сварочных материалов [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.artongas.ru/argon.html>

Отримано 22.04.2013